

Caracterização das Águas Subterrâneas no Alto Cristalino de Salvador-Bahia com Auxílio da Estatística Multivariada

Characterization of Groundwater in the High Crystalline of Salvador-Bahia with the Aid of Multivariate Statistics

Maria da Conceição Rabelo Gomes¹  & Sérgio Augusto de Moraes Nascimento¹ 

¹ Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências (IGEO) Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, BA, Brasil

E-mails: conceicaoabelo@yahoo.com.br; sergiomn@ufba.br

Resumo

Este estudo teve por objetivo conhecer as variáveis responsáveis pela mudança qualitativa das águas subterrâneas e identificar as similaridades entre variáveis físico-químicas no Alto Cristalino de Salvador, que é constituído por um aquífero de natureza misto. Para isso, foram aplicadas técnicas de análise multivariada referente à análise fatorial em componentes principais e análise de agrupamento. A análise fatorial aplicada a variáveis físico-químicas das águas subterrâneas mostrou que três componentes respondem por aproximadamente 91% da variância total: o primeiro associado a litologia (rochas metamórficas paraderivadas e diques máficos); o segundo referente a alcalinidade da água e terceiro indicando a influência marinha e antrópica. A partir da análise de agrupamento, as variáveis do primeiro fator (dureza, cálcio, magnésio) estar relacionada a uma provável influência das rochas paraderivadas constituída por minerais cálcio-magnesianos associada aos tipos máficos metamorfizados. O agrupamento das variáveis do segundo fator (pH, alcalinidade, bicarbonato) representam a alcalinidade das águas indicando processos biológicos e químicos originados na cobertura de solos. O agrupamento das variáveis do terceiro fator apontou a possível relação dos íons Na e Cl estar vinculadas à influência das águas marinhas, particularmente localizada em zona litorânea da cidade de Salvador.

Palavras-chave: Componentes Principais; Análise de Agrupamento; Nordeste

Abstract

This study aims to know the variables responsible for the qualitative change of groundwater and to identify the similarities between physicochemical variables in the Crystalline High of Salvador that is constituted by an aquifer of mixed nature. For this, multivariate analysis techniques were applied regarding factorial analysis in main and cluster components. The factorial analysis applied to physicochemical variables of groundwater showed that three components account for approximately 91% of the total variance: the first associated with lithology (paradigm-derived metamorphic rocks and mafic dikes); the second referring to the alkalinity of the water and the third indicating the marine and anthropic influence. The cluster analysis indicated that the variables of the first factor (hardness, calcium, magnesium) are related to a probable influence of paraderivated rocks constituted by calcium-magnesian minerals associated with metamorphised mafic types. The grouping of the variables of the second factor (pH, alkalinity, bicarbonate) represents the alkalinity of the waters indicating biological and chemical processes originating in the soil cover. The grouping of the variables of the third factor pointed out the possible relationship of Na and Cl ions to be linked to the influence of marine waters, particularly located in the coastal area of the city of Salvador.

Keywords: Principal Components; Cluster Analysis; Northeast

1 Introdução

A análise estatística multivariada consiste em um conjunto de métodos aplicados em situações em que várias variáveis são medidas simultaneamente em cada elemento amostral (Mingoti 2005). A finalidade de sua aplicação é reduzir dados ou de simplificação estrutural, de classificar e agrupar, de investigar a dependência entre variáveis, de predição e de elaborar hipóteses e testá-las (Johnson & Wichern 2007).

Os métodos estatísticos multivariados mais utilizados em Geociências são: análise de agrupamento hierárquico e análise de componentes principais. Análise de agrupamentos (*cluster analysis*) é utilizada quando se deseja explorar as similaridades entre indivíduos (modo Q) ou entre as variáveis (modo R), definindo-se grupos que consideram simultaneamente, no primeiro caso, todas as variáveis observadas em cada indivíduo e, no segundo, todos os indivíduos nos quais foram feitas as mesmas medidas. A análise de componentes principais interpreta a estrutura de um conjunto de dados multivariados, tanto em modo “Q” como em “R”, a partir da respectiva matriz de variâncias-covariâncias ou de correlações, pela obtenção de autovalores e autovetores. A análise de componentes principais é um método introdutório para a análise de fatores, na qual, após os resultados obtidos, é necessária uma rotação dos autovetores (Landim 2011). Segundo Davis (2002), a análise de fatores é um processo de modelagem interativo, onde diversos métodos podem ser aplicados, um dos mais usados é análise de componentes principais.

Existem vários estudos que confirmam a aplicação das técnicas estatísticas multivariadas na avaliação qualitativa das águas subterrâneas e como apoio ao monitoramento eficiente para a gestão dos recursos hídricos (Vidal & Kiang 2002; Brito et al. 2006; Cloutier et al. 2008; Fernandes et al. 2010; Gomes & Cavalcante 2017; Gomes et al. 2020).

Esta pesquisa estudou o caso do Alto Cristalino de Salvador que é constituído por um aquífero de natureza misto formado predominantemente por tonalíticos, charnoenderbíticos e monzodioríticos metamorfizados na fácies granulito. Essas rochas estão intensamente fraturadas e encobertas por um espesso manto de alteração intempélica, por sedimentos Terciários da Formação Barreiras e por sedimentos costeiros Quaternários, esses últimos representados pelas dunas, areias litorâneas e aluviões fluviais. A água subterrânea é em algumas situações utilizada por diversos órgãos públicos e por parte da população, como meio suplementar de abastecimento da região (Nascimento 2008).

Nascimento (2008) ressalta a importância dessa reserva hídrica para gerações futuras em caso de uma

possível necessidade de suplementação de água para a população aliado às perspectivas de escassez e contaminação desse produto nos mananciais de superfície situados cada vez mais distantes dos limites urbanos.

Logo, neste estudo foram utilizadas as análises de componentes principais e agrupamento hierárquico, objetivando conhecer as variáveis responsáveis pela mudança qualitativa das águas subterrâneas e identificar as similaridades entre variáveis físico-químicas.

2 Materiais e Métodos

A área de estudo envolve parte do município de Salvador (8558940 - 8573960 N e 550500 - 572330 S, Zona 24S, Sirgas 2000), com uma área de aproximadamente 335 km².

As águas subterrâneas na área são armazenadas em dois domínios hidrogeológicos distintos, intercomunicáveis entre si, de natureza livre, formando um sistema aquífero heterogêneo e anisotrópico. O primeiro é representado pelas coberturas de solos, sedimentos arenosos litorâneos e arenos-argilosos da Formação Barreiras, com uma espessura média de $19,5 \pm 2,5$ metros, com um valor mediano de 17 metros. O segundo domínio é representado pelo embasamento cristalino (Alto Cristalino de Salvador) que por sua vez forma um aquífero com capacidade de armazenamento ainda mais limitado e restrito às zonas mais fraturadas do corpo rochoso condicionando suas diversas direções preferenciais. Os poços apresentam profundidades que variam de 6,5 a 150 metros, com uma média de 53 metros, sendo que a maioria apresenta uma profundidade situada entre 60 e 80 metros (Nascimento 2008).

Foram selecionadas 32 amostras de águas subterrâneas coletadas em novembro de 2005 (25 poços tubulares, 2 cacimbas e 5 fontes naturais) localizadas na região do Alto Cristalino de Salvador para análise físico-químicas. Os 30 parâmetros físico-químicos analisados foram: pH (potencial hidrogeniônico), Eh (potencial de oxi-redução ou potencial redox), Temperatura (°C), condutividade elétrica (CE), oxigênio dissolvido (OD), salinidade, cor, turbidez, sólidos totais dissolvidos (STD), alcalinidade (CaCO₃), dureza total (CaCO₃), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), potássio (K), bicarbonato (HCO₃), sulfatos (SO₄), cloretos (Cl), amônia (N-NH₃), nitrito (N-NO₂), nitrato (N-NO₃), fosfato (P-PO₄), alumínio (Al), fluoretos (F), Manganês (Mn), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Sílica (SiO₂), vanádio (V) e zinco (Zn). As 32 amostras analisadas totalizaram 960 determinações analíticas.

Na fase de laboratório utilizou-se técnicas e metodologias apropriadas para cada tipo de análise, de acordo com os manuais do *Standard Methods of Water and Wasterwater* 19th e 20th Editions de 1992 e 1998.

A análise estatística foi iniciada com a avaliação do grau de associação entre as variáveis físico-químicas, através da matriz de correlação de *Pearson*. Em seguida, foram aplicadas as técnicas de análise multivariada, que foram processadas no *software SPSS Statistics*, versão 17.0.

Através da análise fatorial buscou-se identificar dimensões de variabilidade comuns (ou fatores) existentes em um conjunto de fenômenos, para desvendar estruturas existentes, mas não observáveis diretamente. Para a extração dos fatores, aplicou-se a análise de componentes principais (ACP), utilizando a rotação *varimax* normalizada. Tal abordagem encontrou componentes lineares de variáveis (modo R) correlacionadas por meio do cálculo dos autovalores e correspondentes autovetores de uma matriz de variâncias-covariâncias ou de uma matriz de coeficientes de correlação entre variáveis (Hoffmann 1992; Manly 1998; Landim 2011). Este procedimento reduziu a dimensão original das n variáveis, gerando coeficientes de correlação, facilitando a interpretação do domínio de observações e identificando grupos de dados correspondente aos seus principais componentes de qualidade. A verificação da adequação dos dados e a análise fatorial foram feitas a partir do índice *KMO* (*Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy*) e do teste estatístico de esfericidade de *Bartlett*, que testa a hipótese nula de que as variáveis analisadas não são correlacionadas (Hair Jr. et al. 1998).

Na análise de agrupamento hierárquico (*clusters analysis*), as amostras (modo Q) foram agrupadas a partir do maior número de variáveis explicadas por um único fator da análise fatorial. Nessa técnica, utilizou-se o método *Ward* como critério hierárquico de agrupamento, com medida de similaridade dada pela distância euclidiana quadrada (*squared euclidean distance*). Esse critério hierárquico de agrupamento utiliza a soma total dos quadrados dos desvios de cada objeto em relação à média do grupo no qual o mesmo foi inserido. A escolha deste critério se fundamentou na frequente empregabilidade do mesmo em estudos de qualidade da água (Vega et al. 1998; Andrade et al. 2007; Andrade et al. 2008; Fernandes et al. 2010; Salgado et al. 2011; Gomes & Cavalcante 2017). O agrupamento foi apresentado por meio de um dendrograma e o ponto de “corte”, utilizado na definição do número de grupos, definido na maior variação da distância reescalada do coeficiente de aglomeração (Ferreira 1996).

Para apresentar a variação espacial dos grupos formados em cada fator, foram gerados mapas, utilizando Sistema de Informações Geográficas - SIG, com coordenadas UTM e Datum SIRGAS 2000.

A partir dos grupos formados na análise de agrupamento, as amostras foram enquadradas qualitativamente conforme a Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL 2017) por ser a normativa mais recente em uso na legislação brasileira.

3 Resultados e Discussão

A análise fatorial pelo método das componentes principais aplicada nas amostras de águas subterrâneas reduziu as variáveis analisadas em três fatores ordenados, explicando aproximadamente 91% da variância total dos dados, sendo o primeiro fator com uma contribuição para explicação da variância total das variáveis de aproximadamente 47%, o segundo de 25% e o terceiro 19% (Tabela 1).

As variáveis do Fator 1 (dureza, cálcio e magnésio) podem estar relacionadas a uma provável influência das rochas paraderivadas e diques máficos constituída por minerais cálcio-magnesianos associada aos tipos máficos metamorfisados. A dureza é uma das variáveis que melhor representa esse fator nas águas subterrâneas do Alto Cristalino de Salvador, tendo sido definida em função do teor de cálcio e magnésio. A dureza apresentou correlação forte com os íons Ca e Mg, confirmando um resultado já esperado, já que a dureza é definida pela maior ou menor presença de íons dissolvidos de Ca e Mg. Esse resultado foi encontrado também por Nascimento (2008).

As variáveis do Fator 2 (pH, alcalinidade e bicarbonato), mostraram que o pH apresentou correlação forte com alcalinidade e bicarbonato, esse resultando já era esperado, já que o HCO_3^- é um dos constituintes da Alcalinidade total. O HCO_3^- e Alcalinidade apresentaram forte correlação com o pH, parâmetro importante para o desdobramento de vários processos biológicos e químicos que refletem nas características das águas. Este resultado indica a forte relação existente entre o pH e as concentrações de gás carbônico, bicarbonatos e carbonatos, corroborando com os resultados de Nascimento (2008) e Gomes & Cavalcante (2017). Essa associação pode estar relacionada com a cobertura pedogenética desenvolvida sobre o embasamento cristalino que forma com esse um sistema aquífero misto.

As variáveis do Fator 3 (CE, sódio e cloretos) representado por uma correlação forte entre as variáveis condutividade elétrica, sódio e cloretos. A sua relação com as águas cloretadas sódicas, muito abundantes na área, é bastante evidente. As águas subterrâneas oriundas dos sedimentos da planície costeira apresentam os maiores valores de cloreto, sódio e condutividade elétrica. Este fator pode expressar também uma influência da contaminação antrópica (Nascimento 2008).

Em função das maiores cargas fatoriais das variáveis que compõem os três fatores, as 9 variáveis utilizadas podem ser representadas por (Tabela 1): Fator 1 - Associada às rochas metamórficas paraderivadas cálcio-magnesianas e diques máficos; Fator 2 - Associada a Alcalinidade e a cobertura regolítica e Fator 3 - Associada à influência marinha e antrópica.

Tabela 1 Cargas fatoriais, comunalidades e variância explicada na análise fatorial das variáveis analisadas, após a rotação pelo método *varimax*.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Comunalidade
pH	0,207	0,859	-0,088	0,789
CE	0,487	0,238	0,813	0,955
Alcalinidade	0,169	0,935	0,215	0,949
Dureza	0,978	0,200	0,052	0,999
Cálcio	0,873	0,232	-0,124	0,831
Magnésio	0,834	0,104	0,251	0,769
Sódio	-0,197	0,292	0,922	0,974
Bicarbonato	0,169	0,935	0,215	0,949
Cloreto	0,097	-0,093	0,964	0,948
Variância explicada pelo fator (%)	47,285	24,504	18,910	-
Variância acumulada (%)		90,699		

Unidade das concentrações: mg/L, exceto CE ($\mu\text{S/cm}$).

A análise de agrupamento hierárquico aplicada aos dados de qualidade das águas subterrâneas permitiu classificar as fontes hídricas em três grupos com características quimicamente semelhantes em cada fator resultante da análise das componentes principais (Figura 1).

O número de grupos foi definido pela primeira grande diferença entre os coeficientes reescalados de agrupamento. Esses coeficientes explicitaram o ponto de corte 5 (maior precisão), onde observou-se a formação de três grupos homogêneos em cada fator.

De acordo com as variáveis do fator 1 (dureza, cálcio e magnésio) foram gerados 3 grupos similares, composto por 44 % (14 poços tubulares), 47 % (8 poços tubulares, 5 fontes naturais e 2 cacimbas) e 9 % (3 poços tubulares) das amostras analisadas nos Grupos 1, 2 e 3, respectivamente (Figura 1A).

O Grupo 1 (14 poços tubulares) é caracterizado por águas com baixas concentrações de minerais cálcio-magnesianos, com cálcio e magnésio variando de 1,0 (PT13) a 17,0 mg/L (PT21) e 2,3 (PT21) a 8,6 mg/L (PT9), respectivamente. A Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde não estabelece valores máximos permitidos (VMP) para Ca e Mg. A dureza oscilou de 15,8 (PT18) a 52,9 mg/L (PT22), encontra-se dentro do VMP pela Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (500 mg/L).

O Grupo 2 (8 poços tubulares, 5 fontes naturais e 2 cacimbas) é composto por águas com concentrações intermediárias de minerais cálcio-magnesianos, com cálcio e magnésio variando de 3,7 (C2) a 42,0 mg/L (FN4) e 4,3 (PT25) a 18,2 mg/L (C2), respectivamente. A dureza oscilou de 60,1 (PT15) a 128,9 mg/L (FN4), estando dentro

do limite permitido pela Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde.

O Grupo 3 (3 poços tubulares) é representado por águas com altas concentrações de minerais cálcio-magnesianos do Alto Cristalino de Salvador, com cálcio e magnésio variando de 36,0 (PT5) a 46 mg/L (PT8) e 22,4 (PT5) a 26,6 mg/L (PT1), respectivamente. A dureza oscilou de 182,2 (PT5) a 221,2 mg/L (PT8), também dentro do valor máximo permitido pela Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde.

De acordo com as variáveis do fator 2 (pH, alcalinidade e bicarbonato) foram gerados 3 grupos similares, composto por 66 % (14 poços tubulares, 5 fontes naturais e 2 cacimbas), 15 % (5 poços tubulares) e 19 % (6 poços tubulares) das amostras analisadas nos Grupos 1, 2 e 3, respectivamente (Figura 1B).

O Grupo 1 (14 poços tubulares, 5 fontes naturais e 2 cacimbas) é caracterizado por águas ácidas (97% das amostras). São águas com pH, variando de 4,2 a 7,3, onde 67% (14 amostras) das águas analisadas estão acima do VMP (6,0 a 9,5) pela Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde para águas de consumo humano. Segundo Hounslow (1995), a principal razão dos valores de pH da água serem inferiores a 6 é a quantidade significativa de minerais de argila; que dissolve e libera sílica e alumínio anormalmente alta para a água. Além da alcalinidade, o pH é essencialmente uma função do gás carbônico dissolvido (CO_2) e dos ácidos orgânicos disponíveis nos solos que aumentam a acidez das águas subterrâneas e a capacidade de dissolver ferro e magnésio. Apresentaram as menores concentrações de alcalinidade (20,2 mg/L) e bicarbonato (24,7 mg/L) nas águas em relação aos Grupos 2 e 3. A

Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde não estabelece VMP para as concentrações de alcalinidade e bicarbonato.

O Grupo 2 (5 poços tubulares) há predominância também de águas ácidas (80% das amostras). São águas com pH, variando de 6,1 a 8,0, onde 100% (5 poços) das águas analisadas estão dentro do limite permitido pela Portaria de

consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde para águas de consumo humano. Segundo Hounslow (1995), os valores mais elevados de pH geralmente se encontram em águas com predominância dos íons sódio e cálcio ou em águas ricas em bicarbonatos; as águas poluídas geralmente são mais ácidas. As concentrações de alcalinidade e bicarbonato variam em média de 71,1 a 86,7 mg/L, respectivamente.

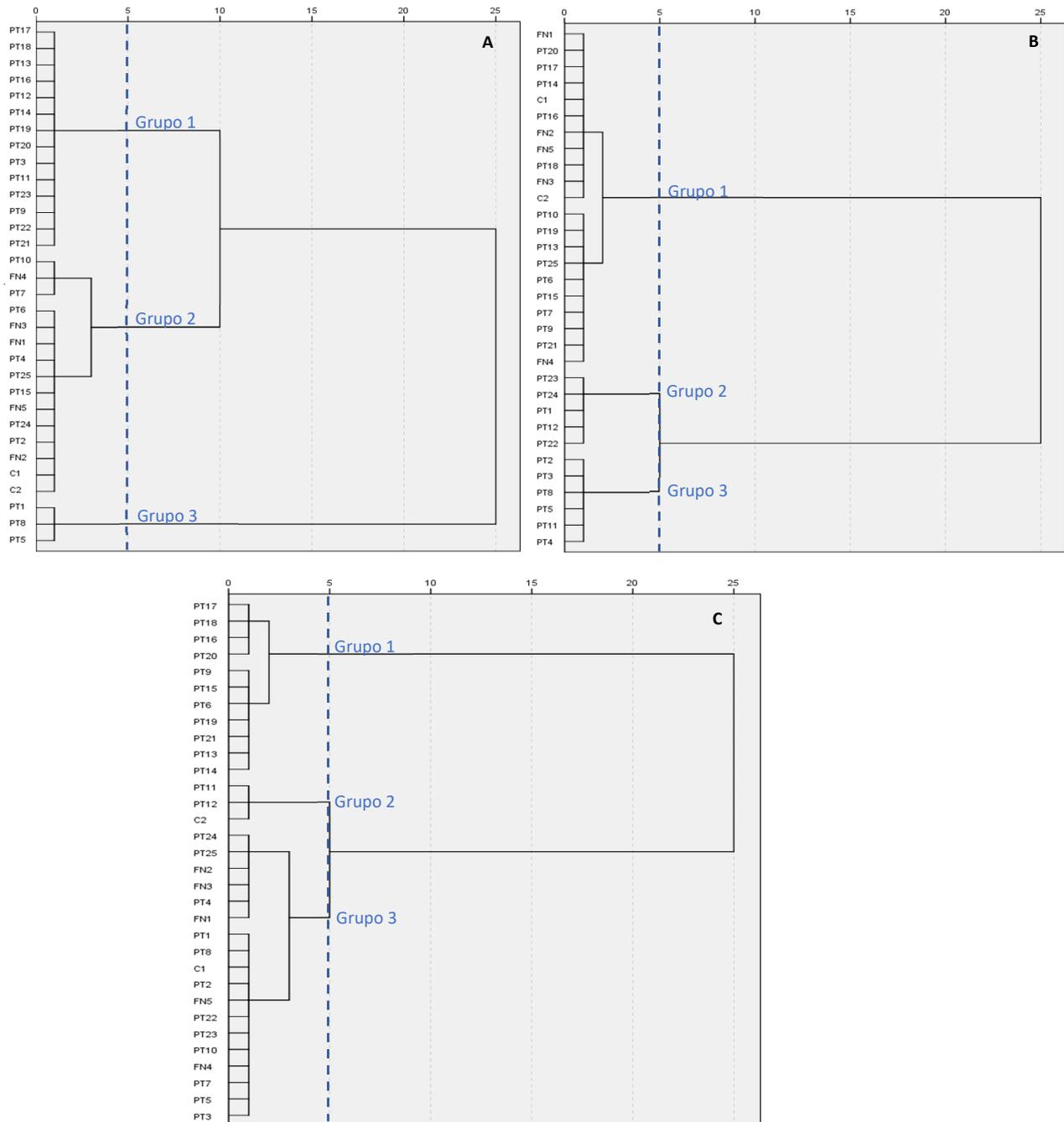


Figura 1 Dendrogramas resultante da análise de agrupamento hierárquico das variáveis explicadas nos Fatores 1 (A), 2 (B) e 3 (C).

No Grupo 3 (6 poços tubulares) se constatou a maior concentração de águas básicas (33%) quando comparado ao segundo grupo (20%). São águas com pH, variando de 6,5 a 7,3, onde 100% (6 poços) das águas analisadas estão dentro do limite permitido pela Portaria vigente. Apresentaram as maiores concentrações de alcalinidade e bicarbonato, com média de 128,0 a 156,2 mg/L, respectivamente. Em geral, as águas de pH baixo tendem a ser corrosivas ou agressivas a determinados materiais (superfícies de cimento-amianto, por exemplo), enquanto as águas de alto pH tendem a formar incrustações e, além disso, com pH ácido também podem causar doenças como gastrite, câncer gástrico e restrições nos usos gerais de indústrias.

De acordo com as variáveis do fator 3 (CE, Na, Cl) foram gerados 3 grupos similares, composto por 34 % (11 poços tubulares), 10 % (2 poços tubulares e 1 cacimba) e 56 % (12 poços tubulares, 5 fontes naturais e 1 cacimba) das amostras analisadas nos Grupos 1, 2 e 3, respectivamente (Figura 1C).

O Grupo 1 (11 poços tubulares) é caracterizado por águas com baixas concentrações de sais (202 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CE), com sódio e cloretos variando de 9,9 (PT21) a 32,7 mg/L (PT13) e 20,1 (PT21) a 59,3 mg/L (PT6), respectivamente, estando todas as amostras dentro dos valores máximos permitidos pela Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde, que é de 200 mg/L de sódio e 250 mg/L de cloreto. O Cloreto é o ânion inorgânico mais frequente nas águas, sendo muito solúvel, estável em solução e de difícil precipitação, não sofrendo oxidação e nem redução em águas naturais.

O Grupo 2 (2 poços tubulares e 1 cacimba) é caracterizado por águas com altas concentrações de sais (694 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CE), com sódio e cloretos variando de 89,7 (C2) a 139,0 mg/L (PT11 e PT12) e 97,5 (PT11) a 137,0 mg/L (PT12), respectivamente, estando todas as amostras dentro dos valores máximos permitidos pela Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde. Segundo Tucci (2001), os cloretos ocorrem em todas as águas naturais e podem ser resultado do contato da água com depósitos minerais e com a água do mar, da poluição por esgotos (domésticos e industriais) ou do retorno de águas utilizadas em irrigação agrícola. Em geral, quantidades razoáveis não são prejudiciais à saúde, mas transmitem à água um sabor salgado, repulsivo

O Grupo 3 (12 poços tubulares, 5 fontes naturais e 1 cacimba) é caracterizado por águas com concentrações de sais intermediárias (484 $\mu\text{S}/\text{cm}$ de CE), com sódio e cloretos variando de 19,5 (PT25) a 103,0 mg/L (PT3) e 29,9 (PT25) a 118,0 mg/L (C1), respectivamente, estando todas as amostras dentro dos valores máximos permitidos pela Portaria de consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde. Segundo Cavalcante (1998), as altas concentrações de cloreto podem ser responsáveis pelo aumento gradativo

de salinidade das águas subterrâneas e, conseqüentemente, pelo aumento de STD. As origens desse elemento podem estar vinculadas à influência das águas marinhas sobre as continentais, particularmente localizada em zona litorânea, ou à captação das águas subterrâneas no meio cristalino. O sódio é um dos metais alcalinos mais importantes e abundantes nas águas subterrâneas, estando presente em todas elas, com predomínio de algumas características, como ampla distribuição nos minerais, baixa estabilidade química dos minerais que o contêm e alta solubilidade, e difícil precipitação da maioria dos seus compostos químicos em solução (Custódio 1965).

As variáveis do fator 1 (Figura 2), associada às rochas metamórficas paraderivadas cálcio-magnesianas e diques máficos presente no Cristalino, sugerem que os poços tubulares identificados como do grupo 1 exploram águas dos Depósitos litorâneos Dunas, Formação Barreiras e Alto Cristalino de Salvador. Os identificados no grupo 2 (poços tubulares, fontes naturais e cacimbas) exploram água dos Depósitos litorâneos, Dunas e Alto Cristalino de Salvador. Nestes, as águas são mais mineralizadas que o grupo anterior. Já os do grupo 3, que captam água somente do Alto Cristalino de Salvador, são águas altamente mineralizadas. Ressalta-se que os 3 grupos atendem ao padrão de potabilidade quanto à concentração de dureza nas águas. Nascimento (2008) corrobora que, o aumento de Mg e Ca nas águas sugerem uma provável influência de litotipos ricos em silicatos do tipo plagioclásio cálcico ou mesmo trocas de base onde o Mg é fixado pelas argilas trocadoras, enquanto o cálcio é liberado para as águas subterrâneas. O aumento também sugere-se a influência de corpos máficos metamorfisados muito comuns dentro do embasamento cristalino.

As variáveis do fator 2 (Figura 3), associada a alcalinidade, indicam que os pontos d'águas (poços tubulares, fontes naturais e cacimbas) pertencentes ao grupo 1 exploram águas dos Depósitos litorâneos e flúvio-lagunares, Dunas, Barreiras e Alto Cristalino de Salvador. São caracterizadas por águas ácidas (97% das amostras). Os identificados no grupo 2 (poços tubulares) exploram água dos Depósitos flúvio-lagunares, Dunas e Alto Cristalino de Salvador. Nestes as águas são menos ácidas (80% das amostras) que o grupo anterior. Já os do grupo 3, que captam água do Alto Cristalino de Salvador, são águas menos ácidas (67% das amostras) que os grupos 1 e 2. Os baixos valores (< 6) de pH encontrados nas águas desses poços provavelmente estão associados as águas do Barreiras, resultando assim, em reações de equilíbrio entre a água e o meio geológico, e também pela introdução de águas recentes no aquífero (águas de chuva), com concentrações mais elevadas de CO_2 , promovendo a diminuição do pH e aumentando, assim, a acidez das águas subterrâneas.

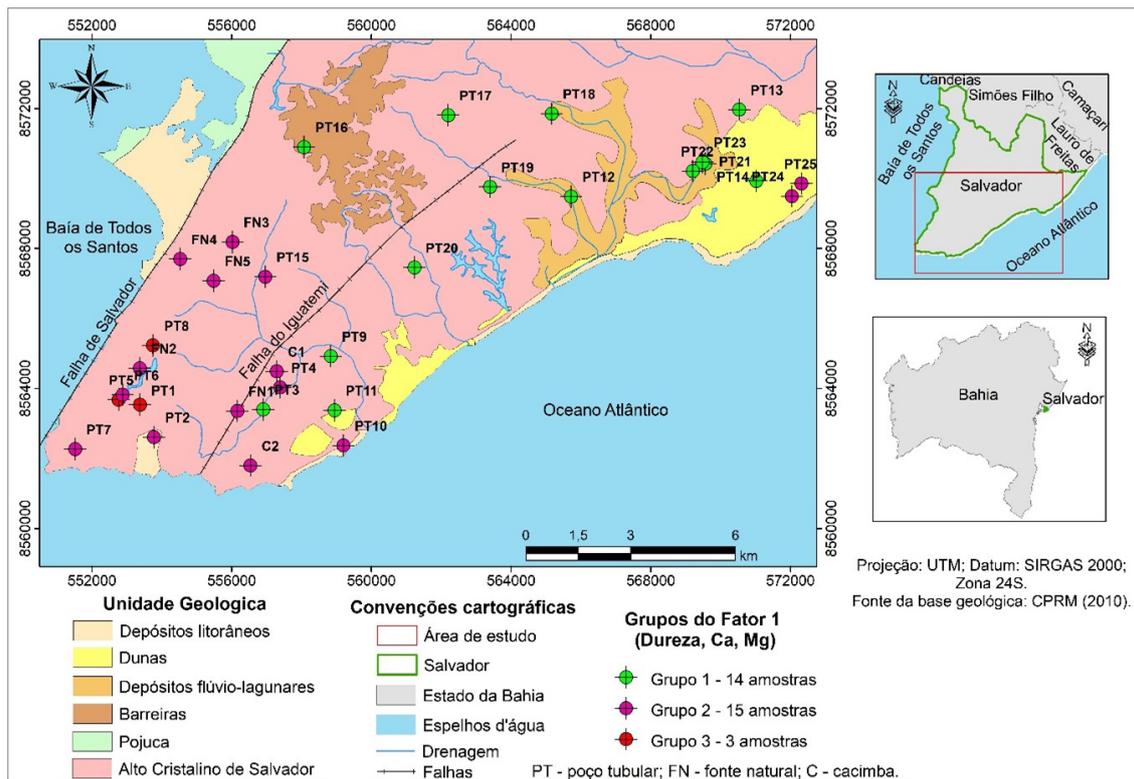


Figura 2 Distribuição espacial das amostras de águas subterrâneas por grupo no fator 1.

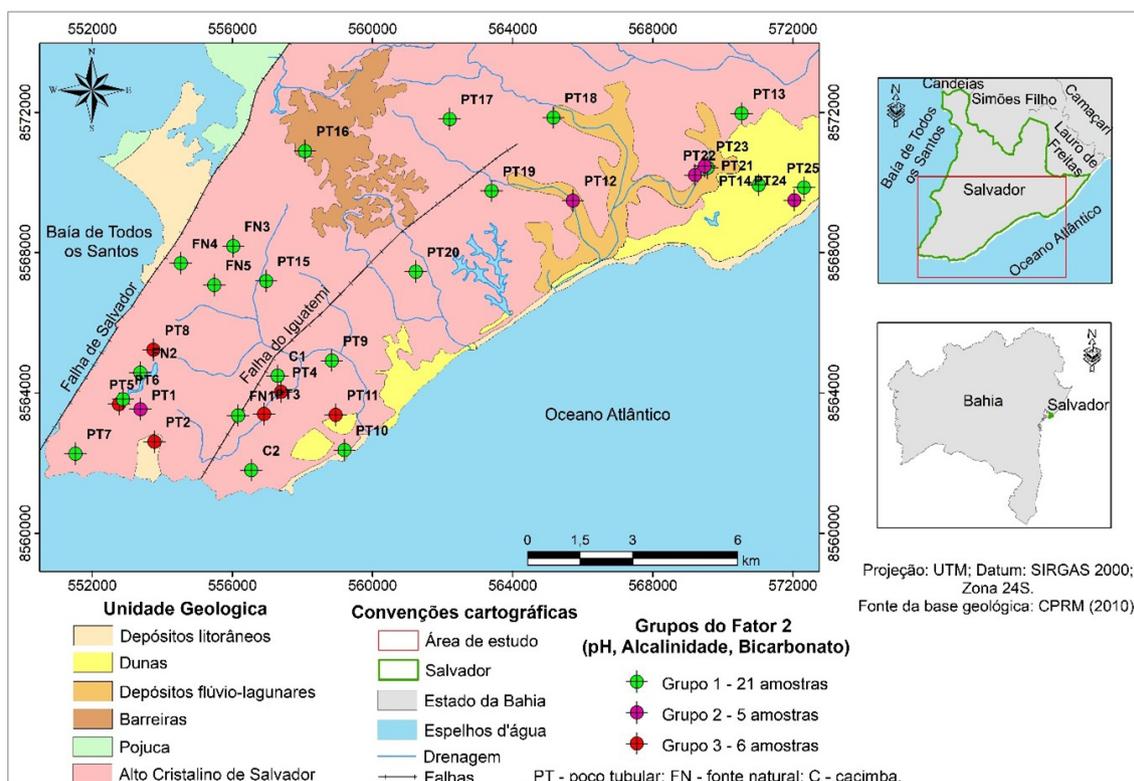


Figura 3 Distribuição espacial das amostras de águas subterrâneas por grupo no fator 2.

As variáveis do fator 3 (Figura 4), associada à influência marinha, indicam que os poços tubulares pertencentes ao grupo 1 são águas com baixa salinidade e exploram águas dos Depósitos flúvio-lagunares, Dunas, Barreiras e Alto Cristalino de Salvador. Os identificados no grupo 2 (poços tubulares e cacimba) exploram água dos Depósitos litorâneos, Dunas e Alto Cristalino de Salvador. Nestes as águas são mais salinas que os grupos 1 e 3. Já os do grupo 3, captam água dos Depósitos litorâneos, Dunas e

Alto Cristalino de Salvador. São águas com concentrações de sais intermediárias. Ressalta-se que os 3 grupos atendem aos padrões de potabilidade quanto às concentrações de Na e Cl. Segundo Nascimento (2008), as águas cloretadas sódicas são dominantes no Alto Cristalino de Salvador, sendo frequentemente encontradas nas zonas de recarga do planalto costeiro dissecado, nos aquíferos formados pelas coberturas de regolito e em alguns locais que apresentam coberturas de sedimentos da Formação Barreiras.

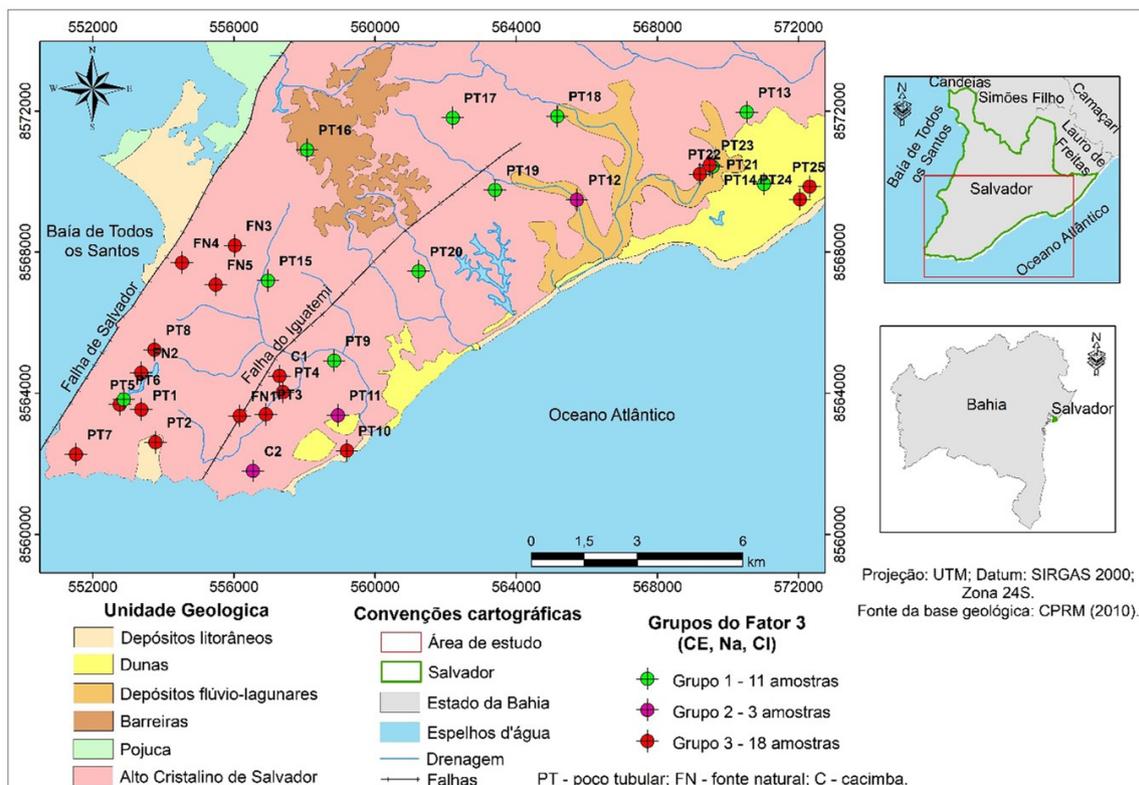


Figura 4 Distribuição espacial das amostras de águas subterrâneas por grupo no fator 3.

4 Considerações Finais

A análise fatorial aplicada a variáveis físico-químicas das águas subterrâneas mostrou que três componentes respondem por aproximadamente 91% da variância total: o primeiro associado a litologia (rochas paraderivadas e diques máficos); o segundo referente a alcalinidade da água e terceiro indicando a influência marinha e antrópica.

A análise de agrupamento aplicada às variáveis do primeiro, segundo e terceiro componentes da análise fatorial apresentou dendrogramas com formação de três grupos, compostos individualmente por amostras com diferentes faixas de concentrações.

O dendrograma proveniente do agrupamento das variáveis do primeiro fator (dureza, cálcio, magnésio)

estar relacionada a uma provável influência das rochas paraderivadas constituída por minerais cálcio-magnesianos associada aos tipos máficos metamorfisados. O dendrograma gerado pelo agrupamento das variáveis do segundo fator (pH, alcalinidade, bicarbonato) representam a alcalinidade das águas e indicam processos biológicos e químicos que refletem nas características das águas que percolam a cobertura regolítica. O dendrograma gerado pelo agrupamento das variáveis do terceiro fator apontou a possível relação dos íons Na e Cl estar vinculadas à influência das águas marinhas, particularmente localizada em zona litorânea de Salvador.

Os resultados mostraram que o uso da análise fatorial pelo método das componentes principais associada à análise de agrupamento é de fundamental importância para se

identificar as principais variáveis qualitativas das águas e reconhecer as relações que podem existir entre essas associações e determinados fenômenos naturais, servido de apoio ao monitoramento eficiente para a gestão dos recursos hídricos na área de estudo.

Os mapas também auxiliaram na interpretação dos resultados, principalmente em relação às tendências espaciais de acordo com os grupos formados.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A (Embasa) pela realização das análises físico-químicas.

6 Referências

- Andrade, E.M.; Araújo, L.F.P.; Rosa, M.F.; Disney, W. & Alves, A.B. 2007, 'Seleção dos indicadores da qualidade das águas superficiais pelo emprego da análise multivariada', *Revista Engenharia Agrícola*, vol. 27, no. 3, pp. 683-690. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000400011>
- Andrade, E.M., Palácio, H.A., Souza, I.H., Oliveira, L.R.A. & Guerreiro, M.J. 2008, 'Land use effects in groundwater composition of an alluvial aquifer (Trussu River, Brazil) by multivariate techniques', *Environmental Research*, vol. 106, no. 2, pp. 170-177. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2007.10.008>
- BRASIL 2017, 'Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017 - dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade', acesso em: 15 fev 2019, <<https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida----o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf>>.
- Brito, L.T.L.; Silva, A. de S.; Srinivasan, V.S.; Galvão, C. de O. & Gheyi, H.R. 2006, 'Uso de análise multivariada na classificação das fontes hídricas subterrâneas na bacia hidrográfica do Salitre', *Revista Engenharia Agrícola*, vol. 26, no. 1, pp. 36-44. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100005>
- Cavalcante, I.N. 1998, 'Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada de recursos hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza, Estado do Ceará', Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-12112015-140423/pt-br.php>
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R. & Savard, M.M. 2008, 'Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system', *Journal of Hydrology*, vol. 353, no. 3-4, pp. 294-313. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015>
- Custódio, E. 1965, *Notas sobre hidroquímica*, Comisaría de águas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas, Barcelona.
- Davis, J.C. 2002, *Statistics and Data Analysis in Geology*, John Wiley & Sons, Nova York.
- Fernandes, F.B.P.; Andrade, E.M. de.; Fontenele, S. de B.; Meireles, A.C.M. & Ribeiro, J.A. 2010, 'Análise de agrupamento como suporte à gestão qualitativa da água subterrânea no semiárido cearense', *Revista Agro@ambiente On-line*, vol. 4, no. 2, pp. 86-95. <http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v4i2.402>
- Ferreira, D.F. 1996, *Análise Multivariada*, Lavras, Minas Gerais.
- Gomes, M.C.R. & Cavalcante, I.N. 2017, 'Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água subterrânea', *Revista Brasileira de Águas Subterrâneas*, vol. 31, no. 1, pp. 134 -149. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28617>
- Gomes, M.C.R.; Anjos, J. A. S. A.; Daltro, R. R. 2020, 'Multivariate statistical analysis applied to the evaluation of groundwater quality in the central-southern portion of the state of Bahia – Brazil', *Rev. Ambient. Água*, vol.15, no. 1, pp.1 - 11. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2408>
- Hair Jr., J.F., Anderson, R.E., Tathan, R.L. & Black, W.C. 1998, *Multivariate data analysis*, Prentice Hall, New Jersey.
- Hoffmann, R. 1992, *Componentes principais e análise fatorial*, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- Hounslow, A.W. 1995, *Water quality data: analysis and interpretation*, Lewis Publishers New York. Boca Raton.
- Johnson, R.A. & Wichern, D.W. 2007, *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Prentice Hall
- Landim, P.M.B. 2011, *Análise estatística de dados geológicos multivariados*, Oficina de textos, São Paulo.
- Manly, B.F.J. 1998, *Multivariate statistical methods*, Chapman & Hall, London.
- Mingoti, S.A. 2005, *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*, Editora UFMG, Belo Horizonte.
- Nascimento, S.A M. 2008, 'Diagnóstico hidrogeológico, hidroquímico e da qualidade da água do aquífero freático do Alto Cristalino de Salvador – Bahia', Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia. <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/23460>
- Salgado, E.V., Andrade, E.M. de, Fontenele, S. de B. & Meireles, A.C.M. 2011, 'Similaridade das variáveis hidroquímicas com o uso da análise multivariada, na Bacia do Salgado, Ceará', *Revista Caatinga*, vol. 24, no. 3, pp. 158-166.
- Tucci, C.E.M. 2001, *Hidrologia: ciência e aplicação*, UFRGS, Porto Alegre.
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E. & Debán, L. 1998, 'Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis', *Water Research*, vol. 32, no. 12, pp. 3581-3592. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00138-9](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00138-9)
- Vidal, A.C. & Kiang, C.H. 2002, 'Caracterização hidroquímica dos aquíferos da bacia de Taubaté', *Revista Brasileira de Geociências*, vol. 32, no. 2, pp. 267-276.

Recebido em: 03/01/2021

Aprovado em: 16/03/2021

Como citar:

Gomes, M.C.R. & Nascimento, S.A.M. 2021, 'Caracterização das Águas Subterrâneas no Alto Cristalino de Salvador-Bahia com Auxílio da Estatística Multivariada', *Anuário do Instituto de Geociências*, vol. 44: 40600. https://doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_40600